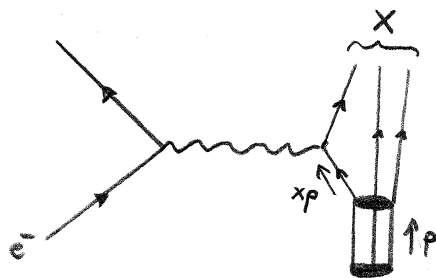


Grundidee: mit einer gewissen Unschärferelation (bestimmt durch



eine "Verteilungsfunktion") löst sich ein Parton (Quark, Gluon) vom Proton, und streut dann elastisch am virtuellen Photon.

→ es kann bewiesen werden, daß aus dieser Grundidee (plus unseren Resultate für $e p$ -Streuung) sowohl das Bjorken-Skalenverhalten als auch die Callan-Gross-Beziehung folgt, mit

$$F_2(x) = x \sum_i Q_i^2 f_i(x), \quad 0 \leq x \leq 1 \quad \leftarrow [5. \text{ Übung, Aufgabe 28(b)}]$$

Partonverteilungsfunktionen / Wahrscheinlichkeitsdichten

aus welchen Partonen besteht das Proton?

- "Valenz"-Quarks, s. Quarkmodell.

Verteilungsfkt'n: $u_v(x)$, $d_v(x)$

- "See"-Quarks, virtuelle $q\bar{q}$ -Paare

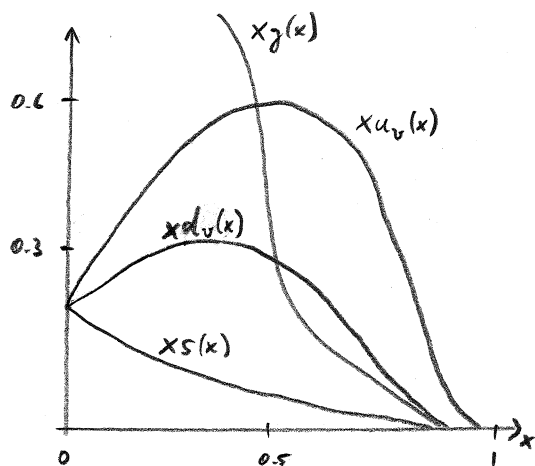
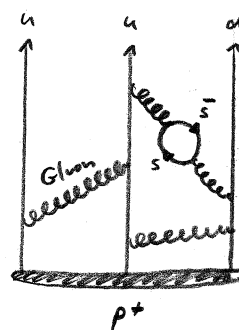
→ $s(x)$, $\bar{s}(x)$

- Gluonen: $g(x)$

diese haben keine elektrische Ladung, koppeln also nicht an das Photon, tragen also nicht zu $F_2(x)$ bei!

tragen jedoch Teil des Proton-Gesamtimpulses $p = \int_0^1 dx \sum_i f_i(x) x p$

⌈ (mehr solcher Summenregeln: Aufg. 29) ⌋



"Weiche" Partonen
wenig Impuls

"harte" Partonen
viel Impuls

⇐ experimentell gemessene
Partonverteilungsfunktionen

Quantenchromodynamik (QCD)

→ Stoff einer ganzen Vorlesung!

hier: nur Struktur / Schlusswörter / Highlights

historisch: Nambu; Gell-Mann; Fritzsch;

Gross, Wilczek, Politzer 1973 → Nobel 2004

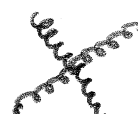
QCD $\equiv$ Theorie der starken Wechselwirkungen

$\hat{=}$ Modelle dieses Kapitels (Quarks, Farbe, Partonen)

+ mathematische Struktur (nichtabelsche Eichtheorie [Yang, Mills 1954])

analog zur QED: spezifiziere QCD durch Feynmanregeln

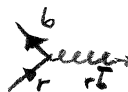
Vertices:



Bem.

- Gluon koppelt an Farbladung

Quarkfarbe ändert sich typischerweise an qqq -Vertex

z.B.  , Gluon trägt Diffusion

- Gluon wechselwirkt daher mit sich selbst (im Gegensatz zum el. neutralen Photon)

- QCD hat sehr wenige Parameter:

"Eichinvarianz" erfordert $\gamma \sim g_s$, $X \sim g_s^2$

- analog zu QED: def. $\alpha_s \equiv \frac{g_s^2}{4\pi}$

hier ist $\alpha_s \approx \frac{1}{10}$ "groß"

- daher funktioniert Störungstheorie i.A. nicht so perfekt wie in der QED.

→ Theorie ist "interessanter", vielseitiger, es gibt einige unerwartete Konsequenzen (s.u.)

- Berechnungen selten präziser als $\sim 1\%$

- eine wichtige Lösungsmethode ist (numerische) Gitter-QCD
- Störungstheorie möglich z.B. für Systeme schwerer Quarks

QCD-Highlights:

- Asymptotische Freiheit:

Kopplungsstärke g_s ist keine Konstante, sondern hängt von Impulsstufen ab, $g_s(Q_E)$ [s. Übung, Aufgaben 30, 31]
 in tiefenl. Streuung z.B. und $g_s \downarrow$ wenn $Q_E^2 \uparrow$,
 und sogar $\lim_{Q_E^2 \rightarrow 0} g_s = 0$.

$\Rightarrow$ erklärt Bjorken-Stufenverhalten: für großes Q_E^2 sind die Partonen tatsächlich freie Teilchen!

Endliches $Q_E^2 \rightarrow$ Korrekturen: Partonverteilungsfkt'n $f_i(x) \rightarrow f_i(Q_E^2, x)$
 $e \rightarrow \mu \rightarrow \nu$ etc

- Quarkenschluss

$g_s \uparrow$ für $Q_E^2 \downarrow$: Quarks sind stark $\Rightarrow$ eng gebundene Zustände (Hadronen)

- "chirale Symmetriebrechung"

(Begriffsklärung: später)

Konsequenz: Massen der leichten Hadronen sind nicht wie vom Quarkmodell suggeriert (z.B. $m_{\pi^+} \approx m_u + m_d$), sondern $m_{\pi^+} \approx \sqrt{26 \text{ eV} \cdot (m_u + m_d)}$

- [$\rightarrow$ s. auch 3 Sonderblätter]